

当前和未来气候下龟纹瓢虫在中国的适生区预测

徐 扬, 张 琦, 郭线茹*, 赵 曼, 李为争,
席玉强, 王高平, 胡明鑫, 张利娟*

(河南农业大学植物保护学院, 郑州 450046)

摘要: 本研究基于龟纹瓢虫 *Propylea japonica* 101 个分布点和 6 个环境因子, 利用 MaxEnt 模型和 ArcGIS 软件对当前和未来气候下龟纹瓢虫在中国的潜在分布进行预测。结果表明: 影响且适于龟纹瓢虫分布的主要环境因子分别为平均月温差 (3.11 ~ 9.27°C)、最热季平均温度 (25.6 ~ 36.61°C) 和最湿月降水量 (154.85 ~ 999.60 mm)。与当前气候相比, 未来 12 个气候情景下的非适生区面积均有不同程度的减少, 低适生区、中适生区和高适生区面积均有不同程度的增加。2090SSP5-8.5 气候情景下的高适生区面积增加最多 (102.55 × 10⁴ km²), 新增区域包括浙江省、山东省、黑龙江省、吉林省、辽宁省等。研究表明, 随着未来气温的升高, 龟纹瓢虫的分布区会向北方扩张, 同时在南方的分布区会进一步扩大。龟纹瓢虫作为一种重要的天敌昆虫, 对多种农业害虫均有较强的捕食作用, 未来适生区面积的增加意味着我们能够更容易地利用其进行害虫防控。

关键词: 龟纹瓢虫; 最大熵模型; 环境因子; 当前气候; 未来气候; 潜在分布

Predicting the suitable regions of *Propylea japonica* in China under current and future climate

XU Yang, ZHANG Qi, GUO Xian-Ru*, ZHAO Man, LI Wei-Zheng, XI Yu-Qiang, WANG Gao-Ping, HU Ming-Xin, ZHANG Li-Juan* (College of Plant Protection, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: In this study, we used the MaxEnt model and ArcGIS software with 101 distribution points and 6 environmental factors to predict the potential distribution of *Propylea japonica* in China under the current and future climate. The results were as follows: Mean of monthly (max temperature - min temperature) (3.11 ~ 9.27°C), mean temperature of warmest quarter (25.65 ~ 36.61°C) and precipitation of wettest month (154.85 ~ 999.60 mm) were the main environmental factors affecting and suiting the distribution of *P. japonica*. Compared with the current climate, the area of unsuitable regions will have different degrees of decrease, and poorly, moderately, highly suitable regions will have various levels of increase under the 12 climate scenarios of future

基金项目: 大学生创新创业训练计划项目 (202310466035); 河南省自然科学基金 (232300420010); 河南省玉米产业技术体系植保岗位科学家科研专项 (HARS-22-02-G3)

作者简介: 徐扬, 男, 硕士研究生, 研究方向为龟纹瓢虫群体遗传学, E-mail: xy2320370189@163.com

*共同通讯作者 Author for correspondence: 郭线茹, 女, 教授, 主要从事昆虫化学生态学和害虫综合治理研究, E-mail: guoxianru@126.com; 张利娟, 女, 副教授, 主要研究农业昆虫群体遗传进化, E-mail: zhlij042@126.com

收稿日期 Received: 2023-09-26; 接受日期 Accepted: 2024-05-30

climate. The area of highly suitable regions showed the largest increase under 2090SSP5-8.5 climate scenario ($102.55 \times 10^4 \text{ km}^2$), new increased regions included Zhejiang, Shandong, Heilongjiang, Jilin, Liaoning provinces, etc. The results showed that *P. japonica* will expand its distribution regions northwards and have further increase in southern China with the increased temperature in the future. *P. japonica* is an important natural enemy with great predation to multiple agricultural pests. The increased area of suitable regions in the future indicates that we can more easily utilize them to control pests.

Key words: *Propylea japonica*; MaxEnt; environmental factors; current climate; future climate; potential distribution

龟纹瓢虫 *Propylea japonica* 是农业生态系统中一种重要的天敌昆虫 (Zhang *et al.*, 2019), 具有诸多优势特征, 如产卵量大, 每雌产卵约 600 粒, 最多可达 1 100 粒以上, 且一次交配可终生产卵 (王萌萌, 2016); 幼虫、成虫均主要以捕食大田作物、蔬菜、果树等植物上的蚜虫为主 (陈洁等, 2009); 食量大, 单头成虫平均每天可捕食蚜虫 27~100 头, 同时抗逆性强 (唐良德等, 2022), 因此在生物防治中具有较高的开发和应用潜力。

利用物种分布模型预测物种在某一时期气候条件下在特定区域的适生区分布是当前一个研究热点。常用的物种分布模型有广义加法模型 (generalized additive model, GAM)、分类与回归树模型 (classification and regression tree, CART)、最大熵模型 (maximum entropy model, MaxEnt) 等 (许仲林等, 2015)。其中最大熵模型基于最大熵原理对物种地理分布进行模拟预测 (唐中海等, 2022), 与其他模型相比, 该模型所需参数更少, 操作更加简单, 结果更加可靠, 且适用于目标物种分布点信息收集较少情况下的预测分析, 因此是目前使用最广泛的物种分布预测模型之一 (West *et al.*, 2016)。Li *et al.* (2020) 使用最大熵模型预测了云斑白条天牛 *Batocera lineolata* 在我国的适生区分布, 结果表明, 在当前气候条件下, 云斑白条天牛分布面积为 $47.17 \times 10^4 \text{ km}^2$, 在未来气候情景下高适生区面积均有不同程度的增加。

世界各地的气候变化在未来几十年里都将加剧且仍得不到有效遏制, 因此气候变化仍被认为是 21 世纪全球生物多样性面临的最主要威胁之一 (王秋生等, 2022)。气候变化对物种的生长和分布有深刻影响甚至导致物种的灭绝 (戴旻峻等, 2022)。龟纹瓢虫作为农业生态系统生物群落的重要组成部分, 在我国的分布是否会随着气候变化而变化, 目前尚未可知。国内已有较多关于龟纹瓢虫的研究, 但主要集中于形态特征、生物学特性、发生规律以及如何提升其防治应用效果等方面 (戈峰和丁岩钦, 1995; 刘鹏远, 2020)。本研究使用 MaxEnt 模型对其在我国的潜在分布进行预测, 并分析影响其分布的主要环境因子, 以为龟纹瓢虫的利用与保护提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 龟纹瓢虫分布数据获取和筛选

通过查阅文献和访问全球生物多样性信息平台 (<https://www.gbif.org>) (Zhang *et al.*, 2015), 初步获取到龟纹瓢虫在中国的分布点 204 个。为减少低准确度分布数据造成的分析

误差，使用 R 语言对分布数据进行去重，同时去除经纬度为零的，围绕在首都、国家中心的，落入海洋的，饲养动物的博物馆（机构）周围的分布点（Feijó等，2021），然后载入 ENMTools 包对分布点进行校对与筛选，以减少过冗余对模型模拟的影响，最终得到 101 个有效的、可用于模型构建的分布数据（图 1）。



图 1 当前气候下龟纹瓢虫在中国的分布点

Fig. 1 Distribution points of *Propylea japonica* in China under current climate

注：该图基于自然资源部标准地图服务系统下载的审图号为 GS (2023) 2762 的标准地图制作，底图无修改。
The map is based on the standard map No. GS (2023) 2762 downloaded from the standard map service system of the Ministry of Natural Resources. The base map has not been modified.

1.2 环境变量获取与筛选

环境数据下载于 WorldClim 网站 (<http://www.world.org>)。当代 (1970-2000) 选用 2.1 版本、分辨率为 5 min 的环境数据；2030 (2021-2040)、2050 (2041-2060)、2070 (2061-2080)、2090 (2081-2100) 选用第六次国际耦合模式比较计划 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6) 北京气候中心中等分辨率气候系统模式 (BCC-CSM2-MR) 下分辨率为 5 min 的环境数据。CMIP6 主要包含 7 种共享社会经济路径 (Shared socioeconomic pathways, SSPs)，分别为 SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP4-3.4、SSP4-6.0 和 SSP5-8.5 (Wang *et al.*, 2022)，本研究使用 SSP1-2.6 (低辐射强迫情景)、SSP3-7.0 (中等至高等辐射强迫情景) 和 SSP5-8.5 (高辐射强迫情景) 3 种气候情景。

环境因子间若具有强烈的共线性，可能导致模型的过度拟合 (毕孟杰等，2015)，需进行多重共线性检验以去除高度相关的环境因子，提高模型预测的精准度。在 ArcGIS 10.2 中提取环境因子数值并使用 IBM SPSS Statistics 26 进行“Pearson”相关性分析。使用 MaxEnt 3.4.4 建立初始模型，得到 19 个环境因子的贡献率。去除贡献率为 0 以及相关系数 $|r| > 0.75$ 的 2 个变量中贡献率较小的环境因子。最后结合龟纹瓢虫在气温低于 10°C 时分散在表土层、草丛基部、落叶、树枝下越冬的习性 (张世泽等，2004)，筛选掉最冷月最低温等低温环境

因子，最终保留 6 个环境因子（表 1）。

1.3 MaxEnt 模型优化和模型构建

1.3.1 模型优化

MaxEnt 的性能会受一些参数的影响（Phillips and Dudik, 2008），因此本研究对调控倍频（regularization multiplier, RM）和特征组合（feature combination, FC）2 个参数进行模型优化。使用 kuenm 包设置 RM 范围为 0.1~4，每次增加 0.1，共 40 个 RM；FC 有 5 种基本类型，分别为线性（linear-L）、二次型（quadratic-Q）、片段化（hinge-H）、乘积型（product-P）和阈值性（threshold-T），由这 5 种基本类型组成 29 种 FC，即 H、L、LH、LP、LPH、LPT、LPTH、LQ、LQH、LQP、LQPH、LQPT、LQPTH、LQT、LQTH、LT、P、PH、PT、PTH、Q、QH、QP、QPH、QPT、QT、QTH、T、TH（曾权等，2023），故共有 1160 种 RM-FC 组合。利用最小信息准则（The minimum information criterion AICc value）评估模型复杂度，当 AICc 值最低时，模型参数组合为最佳。依据优化结果，当 FC 为 QPT、RM 为 1.5 时，AICc 最低，故使用此组合构建 MaxEnt 最终模型。

1.3.2 模型构建

将龟纹瓢虫分布点和 6 个环境数据导入 MaxEnt 3.4.4，设置 FC 为 QPT，RM 为 1.5，随机测试百分比为 25%，最大背景点数量为 10 000，最大迭代次数为 5 000，勾选制作响应曲线、刀切法检验环境变量和随机种子选项，选择输出格式为 Logistic，输出文件类型为*.asc，重复运行类型为自举法（Bootstrap）并运行 10 次，其余参数默认。

1.4 MaxEnt 模型评估

受试者工作特征（receiver operating characteristic, ROC）曲线与横坐标围成的面积为 AUC（area under curve）值，取值越接近 1，说明模型预测效果越好（滕扬等，2022）。MaxEnt 模型评估标准为， $AUC < 0.6$ （预测失败）， $0.6 < AUC < 0.7$ （较差）， $0.7 < AUC < 0.8$ （一般）， $0.8 < AUC < 0.9$ （较好）， $0.9 < AUC < 1$ （极好）。

1.5 适生区划分及面积计算

在 ArcGIS 10.2 中选择“自然间断点分级法”将龟纹瓢虫适生区划分为非、低、中和高适生区，并计算各等级适生区的面积。

1.6 地图资源

中国标准地图来源于自然资源部标准地图服务系统（<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn>），比例为 1:1 000 万，审图号是 GS (2023) 2762 号。

2 结果与分析

2.1 影响龟纹瓢虫在我国分布的主要环境因子

2.1.1 环境因子贡献率判断法

贡献率（Percent contribution）指的是 MaxEnt 模型在训练过程中给出的环境因子对物种地理分布的贡献值（熊巧利等，2019）。用于构建 MaxEnt 模型的 6 个环境因子中，BIO2 的

贡献率最高 (31.17%), 其次为 BIO10 (25.57%) 和 BIO13 (18.29%), BIO8、BIO3、BIO17 贡献率较低 (表 1)。选择前 3 个贡献率最高的环境因子 (BIO2、BIO10 和 BIO13) 为影响龟纹瓢虫分布的主要环境因子, 合计贡献率 75.03%。

一般认为当存在概率大于 0.5 时, 其对应的环境因子的范围适于生物生存 (廖剑锋等, 2020)。环境因子响应曲线表明 (图 2), 3 个主要环境因子适于龟纹瓢虫生存的范围分别是, 平均月温差 3.11 ~ 9.27°C; 最热季平均温度 25.65 ~ 36.61°C; 最湿月降水量 154.85 ~ 999.60 mm。

表 1 环境因子贡献率

Table 1 Contribution rates of environmental factors

环境因子 Environment factors	描述 Description	贡献率 (%) Contribution rates
BIO2	平均月温差 Mean of monthly (max temperature - min temperature)	31.17
BIO10	最热季平均温度 Mean temperature of warmest quarter	25.57
BIO13	最湿月降水量 Precipitation of wettest month	18.29
BIO8	最湿季平均温度 Mean temperature of wettest quarter	12.68
BIO3	等温性 Isothermality	10.75
BIO17	最干季降水量 Precipitation of driest quarter	1.55

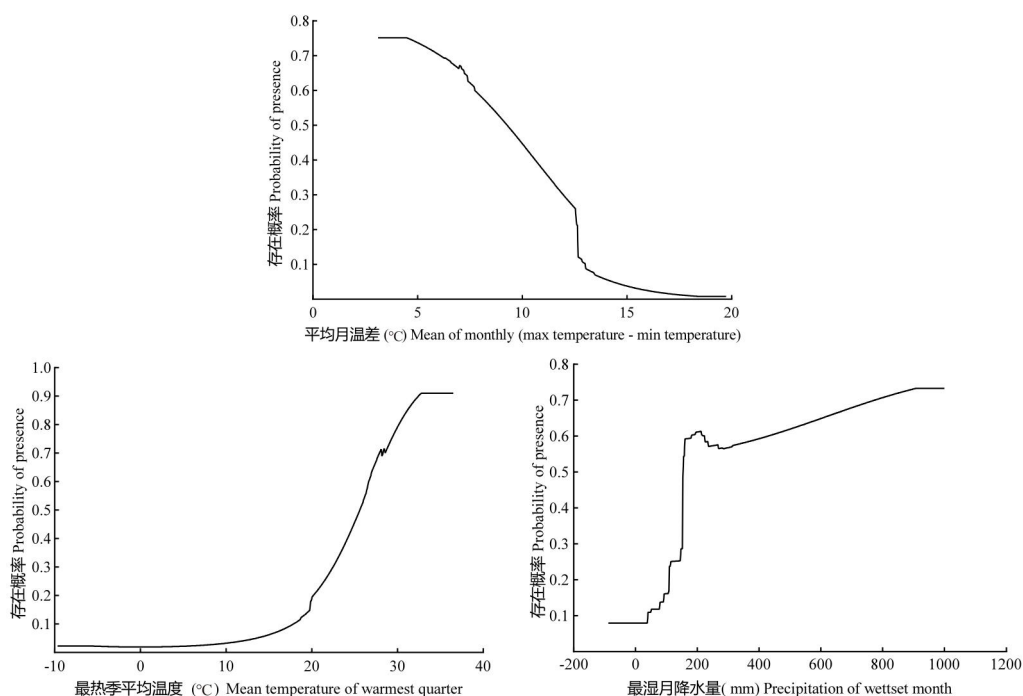


图 2 主要环境因子的响应曲线

Fig. 2 Response curves of main environmental factors

2.1.2 刀切法检验因子得分法

按照刀切法检验因子得分法的判定标准, 即蓝色条带代表“仅此变量”, 条带越长则分

数越高，说明该变量对物种的分布具有较强的预测能力；绿色条带代表“除此变量”，即除此变量外剩余变量贡献之和的训练得分，如果“除此变量”得分较低，说明该变量具有一些独特的信息，对物种分布也很重要；红色条带表示所有变量对模型的累积贡献率（陈豪杰等，2021）。MaxEnt 模型正则化训练增益的刀切法分析图中（图 3），“仅此变量”条带最长的 3 个环境因子为 BIO10、BIO2 和 BIO13，说明这 3 个环境因子对模型增益效果最为明显，对龟纹瓢虫的分布具有较强的预测能力；BIO3 的除此变量条带最短，说明该变量含有某些独特信息，对龟纹瓢虫的分布也很重要。

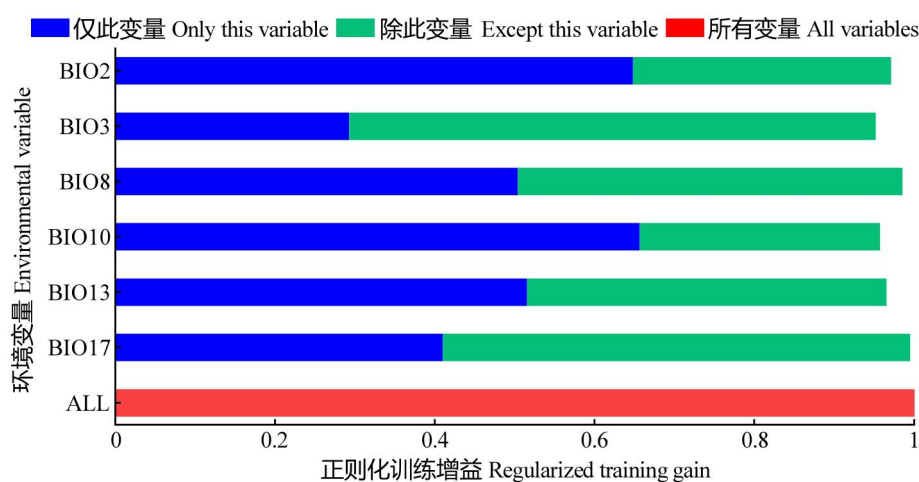


图 3 环境变量刀切法检验结果

Fig. 3 The jackknife test result of environmental variables

2.2 MaxEnt 模型的精确性评估

MaxEnt 3.4.4 软件重复运行 10 次输出的 ROC 曲线的平均 AUC 值为 0.888 ± 0.014 ，说明 MaxEnt 模型的预测精度较好（图 4）。

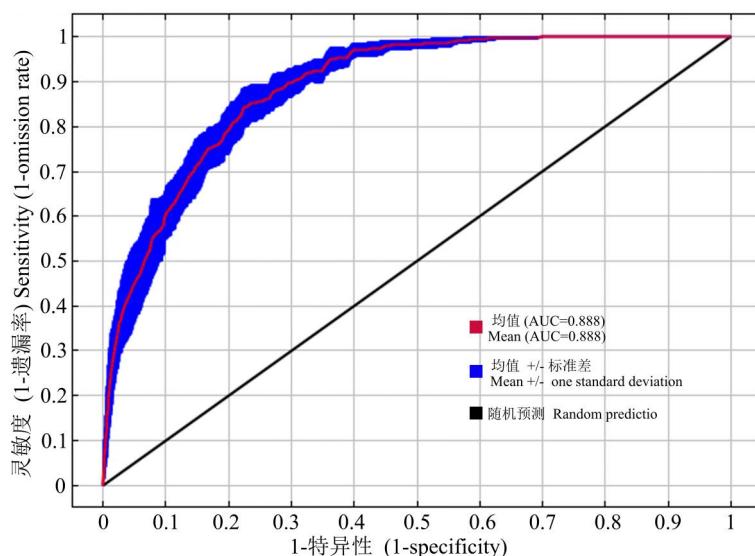


图 4 最大熵模型受试者工作特征曲线

Fig. 4 Receiver operating characteristic curve of MaxEnt model

2.3 当前气候下龟纹瓢虫在我国的适生区分布

将 MaxEnt 3.4.4 软件的输出结果导入 ArcGIS 10.2 中进行重分类处理, 最终得到龟纹瓢虫在我国的适生区分布 (图 5) 和各级分布区的占比与面积 (表 2)。非适生区面积为 $568.42 \times 10^4 \text{ km}^2$ (59.21%), 适生区面积为 $391.58 \times 10^4 \text{ km}^2$ (40.79%)。低适生区面积为 $126.71 \times 10^4 \text{ km}^2$ (13.20%), 主要分布在新疆北部、内蒙古东部和中部、黑龙江北部和东部、吉林东部、辽宁东部和西部、陕西中部和南部、山西南部、甘肃东部、贵州西部、河北北部、台湾南部, 在云南、四川、福建等省份分布相对分散。中适生区面积为 $135.34 \times 10^4 \text{ km}^2$ (14.10%), 中适生区地理分布广泛, 北至黑龙江省, 南至台湾省, 在我国北方集中分布在东北三省、山东省、北京市和河北省东部, 在南方的分布整体可分为三部分: 海南省、台湾省, 浙江、福建、广东、江西四省交界处, 贵州、重庆、湖南、广西 4 个省市区交界处。高适生区面积为 $129.53 \times 10^4 \text{ km}^2$ (13.49%), 高适生区分布集中且在南方地区的分布多于北方。广西、湖南、湖北、江西、江苏、安徽、河南、上海、重庆等省市区几乎全境分布, 广东省南部、浙江省北部、四川省东部、河北省北部、山东省南部和北部存在块状分布区。

表 2 当前气候下龟纹瓢虫在我国的适生区面积

Table 2 The area of suitable regions of *Propylea japonica* in China under current climate

适生等级	面积 (10^4 km^2)	百分比 (%)
Suitable levels	Area	Percentage
非适生区 Unsuitable regions	568.42	59.21
低适生区 Poorly suitable regions	126.71	13.20
中适生区 Moderately suitable regions	135.34	14.10
高适生区 Highly suitable regions	129.53	13.49

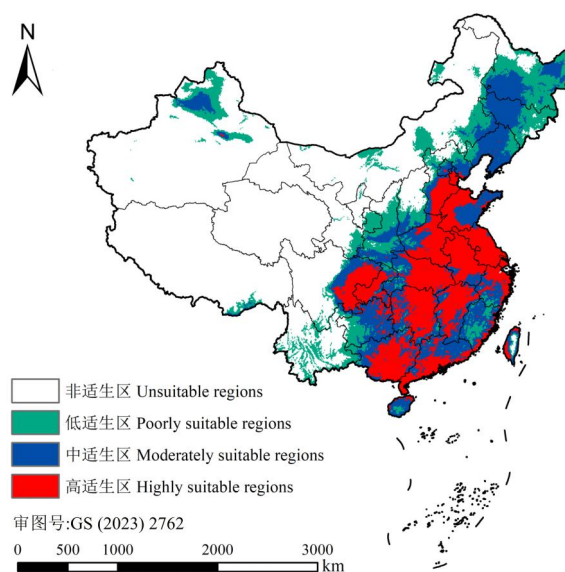


图 5 当前气候下龟纹瓢虫在我国的适生区分布

Fig. 5 Distribution of suitable regions of *Propylea japonica* in China under current climate

注：该图基于自然资源部标准地图服务系统下载的审图号为 GS (2023) 2762 号的标准地图制作，底图无修改。Note: The map was based on the standard map No. GS (2023) 2762 downloaded from the standard map service system of the Ministry of Natural Resources. The base map has not been modified.

2.4 未来气候下龟纹瓢虫在我国的潜在分布

本研究包括未来 4 个时期，每个时期有 3 个气候情景，最终得到龟纹瓢虫在我国的 12 张潜在分布图（图 6）和每个气候情景下各级适生区统计信息（表 3）。

与当前气候相比，龟纹瓢虫在未来 12 个气候情景下的非适生区面积有 $37.1 \times 10^4 \sim 240.61 \times 10^4 \text{ km}^2$ 不同程度的减少，减少最多的为 2090SSP3-7.0 气候情景。低适生区面积有 $13.19 \times 10^4 \sim 123.48 \times 10^4 \text{ km}^2$ 不同程度的增加，2070SSP5-8.5 是增加最多的气候情景。与低适生区相比，中适生区面积整体增幅不大，最高为 $34.78 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，最低仅为 $9.33 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。高适生区面积增幅为 $14.59 \times 10^4 \sim 102.55 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，增加最多的为 2090SSP5-8.5 气候情景。从地理分布看，未来 12 个气候情景下，青海省、四川省西部始终是龟纹瓢虫非适生区。新疆维吾尔自治区的低适生区呈向南扩张的趋势且北部的高适生区面积有小幅增加。内蒙古自治区的低适生区面积大幅增加，在其中 4 个气候情景（2070SSP3-7.0、2070SSP5-8.5、2090SSP3-7.0、2090SSP5-8.5）下的低适生区已基本覆盖内蒙古自治区全境。西藏自治区东南部的小块适生区在 12 个未来气候情景下始终存在且均没有明显的扩张，在 2090SSP3-7.0 和 2090SSP5-8.5 情景下出现了少量高适生区。除 2030SSP1-2.6 和 2030SSP3-7.0 外，龟纹瓢虫在云南省的低适生区均有明显的扩张，几乎覆盖该省全境。未来 12 个气候情景下，龟纹瓢虫在我国的中适生区和高适生区呈现向北方扩张的趋势。在 2070SSP5-8.5、2090SSP3-7.0 和 2090SSP5-8.5 气候情景下，山东省中部和东部的中适生区几乎全部转变为高适生区且高适生区覆盖了该省全境。龟纹瓢虫在南方的高适生区也存在扩大趋势，浙江省西部和南部的低、中适生区基本转化为高适生区。

3 结论与讨论

根据已有研究，龟纹瓢虫在国内分布于台湾、广东、四川、湖南、广西、云南、江西、湖北、河南、甘肃、浙江、江苏、山西、北京、福建、山东、内蒙古等地（郭长飞，2016），上述地区在适生区预测图中均有出现。陈晓娟等（2022）调查发现龟纹瓢虫是四川成都地区常见捕食性瓢虫之一；陈小姝等（2020）在吉林四平市花生田昆虫群落调查中共鉴定到 45 种鞘翅目昆虫，其中龟纹瓢虫的数量位居第二，这些区域在适生区预测图中均显示为中适生区。唐良德等（2023）通过调查得出龟纹瓢虫是海南北部蔬菜生境天敌瓢虫中的优势种，适生区预测图显示海南北部为中、高适生区，说明本研究对当前气候下龟纹瓢虫在我国的适生区预测是准确的。

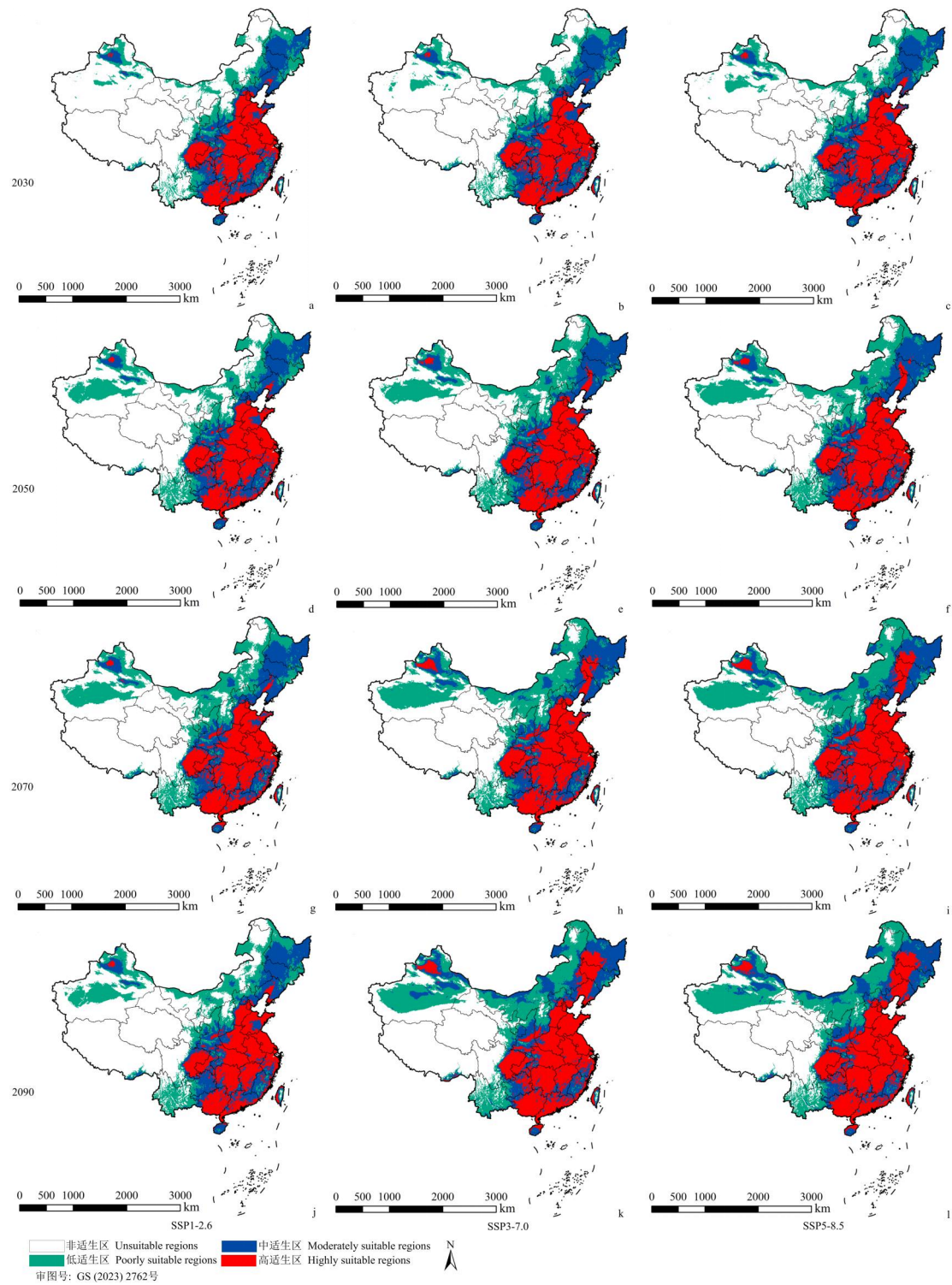


图 6 未来气候下龟纹瓢虫在我国的潜在分布

Fig. 6 Potential distribution of *Propylea japonica* in China under future climate

注：该图基于自然资源部标准地图服务系统下载的审图号为 GS (2023) 2762 号的标准地图制作，底图无修改。a, 2030SSP1-2.6; b, 2030SSP3-7.0; c, 2030SSP5-8.5; d, 2050SSP1-2.6; e, 2050SSP3-7.0; f, 2050SSP5-8.5; g, 2070SSP1-2.6; h, 2070SSP3-7.0; i, 2070SSP5-8.5; j, 2090SSP1-2.6; k, 2090SSP3-7.0; l, 2090SSP5-8.5。Note: The map is based on the standard map No. GS (2023) 2762 downloaded from the standard map service system of the Ministry of Natural Resources. The base map has not been modified. a, 2030SSP1-2.6; b, 2030SSP3-7.0; c,

2030SSP5-8.5; d, 2050SSP1-2.6; e, 2050SSP3-7.0; f, 2050SSP5-8.5; g, 2070SSP1-2.6; h, 2070SSP3-7.0; i, 2070SSP5-8.5; j, 2090SSP1-2.6; k, 2090SSP3-7.0; l, 2090SSP5-8.5.

表 3 不同气候情景下各等级适生区面积 (10⁴ km²)

Table 3 Area of different levels of suitable regions under different climate scenarios (10⁴ km²)

时期 Periods	非适生区 Unsuitable region	低适生区 Poorly suitable region	中适生区 Moderately suitable region	高适生区 Highly suitable region
2030SSP1-2.6	531.32 (-37.10)	139.90 (+13.19)	144.67 (+9.33)	144.11 (+14.59)
2030SSP3-7.0	502.80 (-65.63)	157.98 (+31.27)	154.02 (+18.68)	145.21 (+15.68)
2030SSP5-8.5	486.63 (-81.79)	171.49 (+44.78)	149.90 (+14.56)	151.98 (+22.46)
2050SSP1-2.6	447.07 (-121.35)	204.11 (+77.40)	150.96 (+15.62)	157.86 (+28.33)
2050SSP3-7.0	398.66 (-169.76)	233.53 (+106.82)	160.33 (+24.99)	167.48 (+37.95)
2050SSP5-8.5	380.88 (-187.54)	239.41 (+112.70)	163.90 (+28.56)	175.80 (+46.27)
2070SSP1-2.6	405.18 (-163.24)	230.29 (+103.58)	158.99 (+23.65)	165.54 (+36.02)
2070SSP3-7.0	359.13 (-209.30)	245.28 (+118.57)	167.52 (+32.18)	188.07 (+58.55)
2070SSP5-8.5	339.67 (-228.75)	250.19 (+123.48)	166.24 (+30.90)	203.90 (+74.37)
2090SSP1-2.6	437.80 (-130.63)	206.27 (+79.56)	158.18 (+22.84)	157.76 (+28.23)
2090SSP3-7.0	327.81 (-240.61)	235.96 (+109.24)	170.12 (+34.78)	226.11 (+96.59)
2090SSP5-8.5	329.93 (-238.49)	233.05 (+106.34)	164.94 (+29.60)	232.08 (+102.55)

注：括号内数字表示与当前气候相比各等级适生区在未来各个气候情景下增加或减少的面积。Note: Figure in parenthesis indicates the increased or decreased area of each class of suitable region under each future climate scenario compared to current climate.

龟纹瓢虫在我国发生代数从北向南逐步增加，如在北方的辽宁、吉林一年可发生 4~5 代，通辽地区一年可发生 3~4 代，而在南方的四川一年可发生 7~9 代，长沙可发生 8 代，浙江室内条件下一年可发生 10 代（刘鹏远，2020）。龟纹瓢虫在南方一年内发生世代数多于北方，意味着南方环境条件适于其生长发育。从龟纹瓢虫适生区预测图可以看出，北方地区低、中、高适生区均存在且以低、中适生区为主，而南方地区以中、高适生区为主，可以看出龟纹瓢虫在我国南、北方适生区的差异与其在南、北方地区发生代数的多少是相吻合的。

对于天敌昆虫来说，影响其分布范围的因素，除食物外，温度、湿度等环境因子也发挥着至关重要的作用。龟纹瓢虫喜高温、高湿环境，如其幼虫取食的最适温度和相对湿度分别为 28~30°C 和 72%~79%，蛹发育的最适温度和相对湿度分别是 31°C 和 84%，成虫取食的温度上限为 38~39°C（宋慧英等，1988）。结合龟纹瓢虫在我国南方的高适生区面积多于北方的预测结论，说明南方温润的气候条件适于龟纹瓢虫生存，同时也奠定了龟纹瓢虫随气候变暖向北扩张的生物学基础。

随着环境温度的升高，不同物种潜在适生区的的变化趋势不同（王欣帅等，2023）。杨景林等（2023）研究表明，未来气候变化将导致斑衣蜡蝉 *Lycorma delicatula* 的适生区逐渐向中国北方迁移。颜尉珂等（2023）的研究表明，未来气候变化下灰喜鹊 *Cyanopica cyanus* 在

中国的适生区有显著的扩张趋势，自然分布地种群主要表现为向高纬度、高海拔地区扩散。在本研究中，当前气候下东北三省全境几乎都是龟纹瓢虫低、中适生区，但在未来 12 个气候情景下，几乎所有低适生区均转为中适生区，中适生区转为高适生区，表明未来气候下龟纹瓢虫适生区向我国北方进行了扩张。同时，龟纹瓢虫在我国东南沿海地区的适生区也有扩大趋势。Wang *et al.* (2023) 通过群体遗传研究方法也证实龟纹瓢虫近期呈扩张的趋势。不同发育阶段的龟纹瓢虫具有不同程度的耐热性 (Pumhan *et al.*, 2020)，表明龟纹瓢虫能适应未来温度升高的环境 (Zhang *et al.*, 2020)，并能在南方地区和北方地区扩大其适生区范围。

本研究使用 19 个环境因子预测龟纹瓢虫在当前和未来气候下的潜在分布，但生态环境中影响物种分布的因素还有很多，例如海拔、坡度、地貌等，在今后研究中将收集和考虑更多环境变量，从而使预测结果更加准确。龟纹瓢虫作为一种与农业生产密切相关的天敌昆虫，在未来全球持续变暖情况下，其在我国的适生区面积呈明显增加趋势，高适生区将主要集中在我国农业经济活动频繁、人口密度较高的地区，包括南方地区和北方地区，这为未来更加有效地利用龟纹瓢虫进行害虫防治奠定了理论基础。

参考文献 (References)

- Bi MJ, Shen MW, Zhou KX, *et al.* Geographical variance of ladybird morphology and environmental correlates in China [J]. *Biodiversity Science*, 2015, 23 (6): 775-783. [毕孟杰, 沈梦伟, 周可新, 等. 中国瓢虫体型的地理分异及其与环境因子的关系 [J]. 生物多样性, 2015, 23 (6): 775-783]
- Chen HJ, Nie Y, Liu XH, *et al.* Research on prediction of potential suitable areas of *Populus euphratica* based on MaxEnt model [J]. *China Agricultural Informatics*, 2021, 33 (1): 46-55. [陈豪杰, 聂艳, 刘新华, 等. 基于 MaxEnt 模型的胡杨潜在适生区预测研究 [J]. 中国农业信息, 2021, 33 (1): 46-55]
- Chen J, Qin QJ, He YZ. Effects of temperature on laboratory population of *Propylea japonica* (Thunberg) [J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2009, 32 (6): 69-72, 79. [陈洁, 秦秋菊, 何运转. 温度对龟纹瓢虫实验种群生长发育的影响 [J]. 河北农业大学学报, 2009, 32 (6): 69-72, 79]
- Chen XJ, Chen QH. Several common predatory ladybugs in Chengdu region [J]. *Sichuan Agricultural Science and Technology*, 2022, 422 (11): 60-62. [陈晓娟, 陈庆华. 成都地区几种常见捕食性瓢虫 [J]. 四川农业科技, 2022, 422 (11): 60-62]
- Chen XS, Lv YC, Qu MJ, *et al.* Analysis of species diversity and interannual dynamics of insect in peanut field of Siping region in Jilin Province [J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2020, 45 (4): 63-70. [陈小姝, 吕永超, 曲明静, 等. 吉林四平地区花生田地上昆虫种类、多样性及年际发生动态分析 [J]. 东北农业科学, 2020, 45 (4): 63-70]
- Dai MJ, Li XY, Wang MQ, *et al.* Potentially suitable area of *Cryptomeria japonica* var. *sinensis* and the influence of climate changes on its distribution [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, 37 (6): 26-33, 128. [戴旻峻, 李鑫玉, 王敏求, 等. 柳杉潜在适生区预测及气候变化对其分布的影响 [J]. 西北林学院学报, 2022, 37 (6): 26-33, 128]
- Feijó A, Ge DY, Wen ZX, *et al.* Exploring GBIF database and extracting climate data from georeferenced localities with R software [J]. *Bio-101*, 2021: e1010609. [Feijó A, 葛德燕, 温知新, 等. 利用 R 软件在 GBIF 网站下载和筛选物种分布记录并提取气候数据进行分析 [J]. *Bio-101*, 2021: e1010609]
- Ge F, Ding YQ. The foraging behavior of lady beetle *Propylea japonica* towards cotton aphids *Aphis gossypii* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 38 (4): 436-441. [戈峰, 丁岩钦. 龟纹瓢虫对棉蚜的捕食行为 [J]. 生态学报, 1995, 38 (4): 436-441]
- Guo CF. Color Variations Investigation of *Harmonia axyridis* and the Influence of Temperature and Food on Color Mottle Differentiation of *Propylea japonica* [D]. Guangzhou: South China Agricultural University Master Thesis, 2016. [郭长飞. 异色瓢虫色斑调查和温度及食物对龟纹瓢虫色斑分化的影响 [D]. 广州: 华南农业大学硕士论文, 2016]
- Li AN, Wang JW, Wang RL, *et al.* MaxEnt modeling to predict current and future distributions of *Batocera lineolate* (Coleoptera: Cerambycidae) under climate change in China [J]. *Écoscience*, 2020, 27 (1): 23-31.

- Liao JF, Yi ZL, Li SC, *et al.* Maxent modeling for predicting the potentially geographical distribution of *Miscanthus nudipes* under different climate conditions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40 (22): 8297-8305. [廖剑锋, 易自力, 李世成, 等. 基于 Maxent 模型的双药芒不同时期潜在分布研究 [J]. 生态学报, 2020, 40 (22): 8297-8305]
- Liu PY. Research on Artificial Breeding of *Propylaea japonica* and the Control Techniques of *Propylaea japonica* Combined with *Encarsia formosa* Release for *Bemisia tabaci* [D]. Taian: Shandong Agricultural University Master Thesis, 2020. [刘鹏远. 龟纹瓢虫人工繁育及其与丽蚜小蜂联合防控烟粉虱技术研究 [D]. 泰安: 山东农业大学硕士论文, 2020]
- Phillips SJ, Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent: New extensions and a comprehensive evaluation [J]. *Ecography*, 2008, 31 (2): 161-175.
- Pumhan N, Tian M, Xu LL, *et al.* Effects of heat stress and exposure duration on survival characteristics of different developmental stages of *Propylaea japonica*, a dominant aphidophagous ladybeetle in China [J]. *Crop Protection*, 2020, 130: 105054.
- Song HY, Wu LY, Chen GF, *et al.* Biological characters of lady-beetle, *Propylaea japonica* (Thunberg) [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 1988, 10 (1): 22-33. [宋慧英, 吴力游, 陈国发, 等. 龟纹瓢虫生物学特性的研究 [J]. 环境昆虫学报, 1988, 10 (1): 22-33]
- Tang LD, Zhao HY, Guo LH. Community structure and species diversity of predatory ladybeetles in vegetable crops in north Hainan [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2023, 45 (4): 1054-1062. [唐良德, 赵海燕, 郭灵杭. 海南北部蔬菜生境天敌瓢虫多样性研究 [J]. 环境昆虫学报, 2023, 45 (4): 1054-1062]
- Tang LD, Zhao HY, Guo LH. The sensitivity of *Propylaea japonica* and *Menochilus sexmaculata* (Coleoptera: Coccinellidae) to differential insecticides [J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2022, 41 (1): 34-40. [唐良德, 赵海燕, 郭灵杭. 龟纹瓢虫和六斑月瓢虫对农药的敏感性研究 [J]. 山地农业生物学报, 2022, 41 (1): 34-40]
- Tang ZH, Luo HL, Wang JH, *et al.* Potential suitable habitat and protection gap analysis of white-lipped deer (*Cervus albirostris*) based on GIS and Maxent model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42 (22): 9394-9403. [唐中海, 罗华林, 王建华, 等. 基于 GIS 和 Maxent 模型的白唇鹿 (*Cervus albirostris*) 潜在适宜生境及保护 GAP 分析 [J]. 生态学报, 2022, 42 (22): 9394-9403]
- Teng Y, Zhang Z, Zhang SL, *et al.* Habitat suitability analysis and ecological corridor designs for red deer (*Cervus elaphus*) in the southern Greater Khingan Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42 (14): 5990-6000. [滕扬, 张沼, 张书理, 等. 大兴安岭南段马鹿生境适宜性分析与生态廊道构建 [J]. 生态学报, 2022, 42 (14): 5990-6000]
- Wang L, Shu ZK, Wang GQ, *et al.* Analysis of future meteorological drought changes in the Yellow River Basin under climate change [J]. *Water*, 2022, 14 (12): 1896.
- Wang MM. The Total Length of *ace1* Gene cDNA Sequence and Expression in Insecticide-resistant and -susceptible *Propylaea japonica* [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University Master Thesis, 2016. [王萌萌. 抗性与敏感龟纹瓢虫 *ace1* 基因 cDNA 全长的克隆与表达 [D]. 福州: 福建农林大学硕士论文, 2016]
- Wang MQ, Zhang HR, Xi YQ, *et al.* Population genetic variation and historical dynamics of the natural enemy insect *Propylaea japonica* (Coleoptera: Coccinellidae) in China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2023, 22 (8): 2456-2469.
- Wang QS, Wen L, Su XK. Spatial-temporal pattern changes of Tibetan antelope's habitats on the Qinghai-Tibetan Plateau under climate change scenarios [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42 (22): 8985-8993. [王秋生, 温璐, 苏旭坤. 气候变化背景下青藏高原藏羚羊生境时空格局演变 [J]. 生态学报, 2022, 42 (22): 8985-8993]
- Wang XS, Liu XY, Zhao CY. Potential distribution pattern and trends of Devil's beggarticks *Bidens frondosa* L. in China under global climate change [J]. *Journal of Plant Protection*, 2023, 50 (6): 1548-1560. [王欣帅, 柳晓燕, 赵彩云. 全球气候变化下大狼把草在中国的潜在分布格局及变化趋势 [J]. 植物保护学报, 2023, 50 (6): 1548-1560]
- West A M, Kumar S, Brown CS, *et al.* Field validation of an invasive species Maxent model [J]. *Ecological Informatics*, 2016, 36: 126-134.
- Xiong QL, He YL, Deng FY, *et al.* Assessment of alpine mean response to climate change in Southwest China based on MaxEnt model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39 (24): 9033-9043. [熊巧利, 何云玲, 邓福英, 等. 基于 MaxEnt 模型西南地区高山植被对气候变化的响应评估 [J]. 生态学报, 2019, 39 (24): 9033-9043]
- Xu ZL, Peng HH, Peng SZ, *et al.* The development and evaluation of species distribution models [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (2): 557-567. [许仲林, 彭焕华, 彭守璋. 物种分布模型的发展及评价方法 [J]. 生态学报, 2015, 35 (2): 557-567]
- Yan WK, Lei Y, Wang L, *et al.* Effects of artificial introduction and climate change on the future distribution of *Cyanopica cyanus* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43 (24): 10387-10398. [颜尉珂, 雷宇, 王磊, 等. 人为引入和气候变化对灰喜鹊未来分布的影响 [J]. 生态学报, 2023, 43 (24): 10387-10398]
- Yang JL, Wang T, Zhou YT, *et al.* Effects of climate change on the potential distribution of *Lycorma delicatula* (Homoptera: Fulgoridae) in Chian [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2023, 51 (11): 150-156. [杨景林, 王涛, 周玉婷, 等. 气候变化对斑衣蜡蝉在中国潜在适生区分布的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2023, 51 (11): 150-156]

- Zeng Q, Zhu XZ, Zhou LJ. Prediction of potential suitable region for *Emex australis* in China based on the optimized MaxEnt model [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2023, 44 (2): 254-262. [曾权, 朱雪珍, 周利娟. 基于优化 MaxEnt 模型的南方三棘果在中国的潜在适生区预测 [J]. 华南农业大学学报, 2023, 44 (2): 254-262]
- Zhang LJ, Li S, Luo JY, *et al.* Chromosome-level genome assembly of the predator *Propylea japonica* to understand its tolerance to insecticides and high temperatures [J]. *Molecular Ecology Resources*, 2020, 20 (1): 292-307.
- Zhang S, Luo JY, Jiang WL, *et al.* Response of the bacterial community of *Propylea japonica* (Thunberg) to Cry2Ab protein [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 254 (PartB): 113063.
- Zhang SZ, Fu WY, Li N, *et al.* Antioxidant responses of *Propylaea japonica* (Coleoptera: Coccinellidae) exposed to high temperature stress [J]. *Journal of Insect Physiology*, 2015, 73: 47-52.
- Zhang SZ, Wu JX, Zhang Q, *et al.* Research advances of *Propylaea japonica* (Thunberg) in biology, ecology and utilization [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2004, 22 (4): 206-210. [张世泽, 仵均祥, 张强, 等. 龟纹瓢虫生物生态学特性及饲养利用研究进展 [J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22 (4): 206-210]